

高职高专规划教材

金属材料焊接

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

张连生 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



半制造业等职业，高职高专规划教材

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会 组编

主 编 张连生

副主编 许志安

参 编 贾瑞灵 胡永旺

主 审 亢世江



机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

本书是根据高职高专教育培养目标及全国高职高专院校焊接专业教学研讨会所制定的教学大纲编写的,突出了工程应用性和实践性。力求在阐明必要基础知识和客观规律的同时,能够帮助读者解决具体工程问题,提高实际工作能力。

全书共分八章,第一章介绍了金属焊接性及其试验方法;第二至六章比较全面系统地论述了碳素钢、低合金钢、不锈钢、耐热钢和铸铁等黑色金属的焊接性及焊接工艺;第七章重点阐述了几种常用有色金属(铝、铜、钛及其合金)的焊接特点及工艺;第八章扼要地讨论了堆焊合金、堆焊方法及工艺。另外,在相应章节中穿插了一些典型的工程实例;每章末均附有复习思考题。

本书为高职高专院校焊接专业教材,也可供从事焊接专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料焊接/张连生主编. —北京:机械工业出版社, 2004.7
高职高专规划教材
ISBN 7-111-14604-2

I. 金... II. 张... III. 焊接—高等学校:技术学校—教材 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 052592 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:张祖凤 何月秋
责任编辑:何月秋 版式设计:张世琴 责任校对:樊钟英
封面设计:陈 沛 责任印制:施 红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·12.5 印张·306 千字

定价:19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前言

根据全国机械职业教育专业教学指导委员会关于“深化高等职业技术教育人才的改革,加强高职教材建设”的精神,结合市场需要,于2002年8月我们与机械工业出版社共同邀请了全国十几所开办焊接专业的高职高专院校召开了编写这套教材的启动会,在会上大家就焊接专业的课程体系、教材的编写目的和要求、教材书目,以及编写人员的分工进行了研讨,最终达成共识。

高等职业技术教育是我国高等教育的重要组成部分,是培养适应生产、建设、管理、服务于第一线需要的高等技术应用性专门人才的摇篮。高职学生应具有基础理论知识适度、技术应用能力强、知识面较宽、素质高等特点。我们应以“应用”为主旨和特征构建课程和教学内容体系,突出应用性、实践性的原则重组课程结构、更新教学内容。高职教学内容要突出基础理论知识的应用和实践能力的培养,基础理论教学要以应用为目的,以“必需、够用”为度;专业课教学要加强针对性和实用性。在此共识的基础上,我们组织广西机电职业技术学院、内蒙古工业大学、四川工程职业技术学院、包头职业技术学院、承德石油高等专科学校、沈阳职业技术学院、陕西工业职业技术学院、渤海船舶职业技术学院、湖南张家界航空工业职业技术学院、新疆机电职业技术学院、内蒙古机电职业技术学院等十余所高职院校编写了这套高职高专焊接专业规划教材。此套教材首批包括:《金属学与热处理》、《焊接结构生产》、《焊接方法与设备》、《焊接生产管理与检测》、《金属熔焊原理》、《金属材料焊接》、《焊接技能实训》、《热加工专业英语》。

本套教材根据2001年国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会和2002年4月、8月的高职高专焊接专业规划教材的专题会议精神,于2002年4月成立了教材编写委员会,2003年年初由各教材的主编、主审统稿,并进行初审,同年8月聘请了西南交通大学、内蒙古工业大学、沈阳工业大学、四川工程职业技术学院等院校的专家教授对此套教材进行了全面审编、定稿。

本套教材的编写以突出应用性、实践性的原则重组课程结构,破除了原有各种课程的学科化倾向,删除了与岗位群职业能力关系不大的内容,增加了与职业能力关系有关的高新技术、新工艺、新设备、新材料。课程内容紧紧扣住培养学生现场工艺实施的职业能力来阐述,将必需的理论知识点融于能力培养过程中,注重实践教学,注重操作技能培养。本套教材深度适宜,文字简洁、流畅,深入浅出,非常适合高职学生学习。为与国际接轨,体现教材的先进性,本套教材采用了最新国家标准和国家施行的国际单位制。

本套教材在编写和审稿过程中,得到了各参编参审学校和许多兄弟院校领导及同仁的大力支持与热情帮助,在此一并表示衷心的感谢。

国家机械职业教育热加工类专业教学指导委员会

编者的话

本书是根据高职高专教育培养目标及 2002 年 8 月全国高等职业教育焊接专业教学研讨会所制定的教学计划和教学大纲编写的。

本书主要讨论各种常用金属材料的焊接性, 以及如何根据金属材料的焊接性特点选择焊接材料, 制定合理的焊接工艺。全书共分八章, 依次讨论了金属焊接性及其试验方法; 碳素钢、低合金钢、不锈钢、耐热钢、铸铁、有色金属及堆焊合金的焊接性分析; 焊接(堆焊)材料的选择与焊接工艺要点的论述。编写时注意了教学原则和教学实践方面的要求, 同时力图突出高职高专教育的特点, 强调重要的概念, 降低理论深度、难度, 注重工程应用性。论述中不追求旁证博引, 不作过多纯理论学术的探讨。仅力求在阐明有关金属材料焊接性的基础上, 着力讨论各种金属材料焊接问题及解决这些问题的途径、方法和措施。并能以此指导实际, 与焊接实践密切联系。使学生通过本门课程的学习和实践, 不仅能为将来解决各种金属材料焊接问题、制定正确工艺方案等奠定必要的理论基础, 又能将所制定工艺方案或高层次设计转化成可操作技术。本书为高职高专院校焊接专业教材, 也可供从事焊接专业工作的工程技术人员参考。

本书由承德石油高等专科学校张连生教授任主编, 渤海船舶职业学院许志安副教授任副主编。其中第一章由承德石油高等专科学校张连生教授和新疆机电职业技术学院胡永旺副教授合写; 第四、五、八章由渤海船舶职业学院许志安副教授编写; 第七章由内蒙古工业大学贾瑞灵副教授编写; 其余各章由承德石油高等专科学校张连生教授编写。全书由张连生教授统稿, 由河北工业大学亢世江教授主审。

本书在编写过程中, 参考了高等学校有关教材、专业工具书以及国内出版的资料, 在此谨向上述诸作者致以衷心谢意。

由于编者学识水平所限, 书中难免有缺点和错误, 敬望读者批评指正。

编者

2004 年 6 月

目 录

前言	1	三、高碳钢焊接实例	26
编者的话	1	复习思考题	26
绪论	1	第三章 低合金钢的焊接	27
第一章 金属焊接性及其试验方法	3	第一节 低合金钢概述	27
第一节 金属的焊接性	3	一、高强度钢	27
一、金属焊接性的概念	3	二、专业用钢	28
二、影响焊接性的因素	4	第二节 热轧及正火钢的焊接	29
三、分析金属焊接性的方法	5	一、热轧及正火钢的成分与性能	29
第二节 金属焊接性试验	7	二、热轧及正火钢的焊接性分析	32
一、焊接性试验的内容	7	三、热轧及正火钢的焊接工艺	35
二、焊接性试验方法分类	7	四、典型钢种的焊接实例	39
三、焊接性试验方法的选择原则	8	第三节 低碳低合金调质钢的焊接	40
第三节 常用的焊接性试验方法	9	一、低碳低合金调质钢的成分与性能	40
一、斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法	9	二、低碳低合金调质钢的焊接性分析	41
二、插销试验	10	三、低碳低合金调质钢的焊接工艺	44
三、焊接热影响区最高硬度试验方法	12	四、典型钢种的焊接实例	46
四、其他焊接性试验方法简介	13	第四节 中碳调质钢的焊接	47
复习思考题	15	一、中碳调质钢的成分与性能	48
第二章 碳素钢的焊接	16	二、中碳调质钢的焊接性分析	50
第一节 碳素钢概述	16	三、中碳调质钢的焊接工艺	51
一、碳素钢的种类	16	四、典型钢种的焊接实例	53
二、碳素钢的焊接性	16	第五节 低温用钢的焊接	53
第二节 低碳钢的焊接	18	一、低温用钢的成分与性能	53
一、低碳钢的焊接性	18	二、低温用钢的焊接性分析	55
二、低碳钢的焊接工艺	19	三、低温用钢的焊接特点	55
三、焊接低碳钢的先进焊接工艺方法	20	四、典型钢种的焊接实例	56
第三节 中碳钢的焊接	22	第六节 低合金耐蚀钢的焊接	57
一、中碳钢的焊接性	22	一、耐候钢、耐海水腐蚀用钢的焊接特点	57
二、中碳钢的焊接工艺	22	二、耐硫和硫化物腐蚀用钢的焊接特点	58
三、中碳钢焊接实例	24	复习思考题	60
第四节 高碳钢的焊接	24	第四章 不锈钢的焊接	61
一、高碳钢的焊接性	24	第一节 不锈钢的类型及性能	61
二、高碳钢的焊接工艺	25		

一、不锈钢的类型.....	61	一、低合金钢与奥氏体不锈钢的焊接性 ...	107
二、不锈钢的性能.....	63	二、低合金钢与奥氏体不锈钢的焊接工艺特点	112
第二节 奥氏体不锈钢、双相不锈钢的焊接	66	三、复合钢板的焊接特点	114
一、奥氏体不锈钢的焊接性.....	66	四、焊接工程实例	116
二、双相不锈钢的焊接性.....	70	复习思考题	119
三、奥氏体不锈钢、双相不锈钢的焊接工艺.....	72	第六章 铸铁的焊接.....	120
四、典型 18-8 钢的焊接工艺	76	第一节 铸铁的种类及性能	120
第三节 铁素体不锈钢的焊接	77	一、铸铁的种类及成分	120
一、铁素体不锈钢的类型和特性.....	77	二、铸铁的组织与性能	121
二、铁素体不锈钢的焊接性.....	77	第二节 灰铸铁的焊接性	123
三、铁素体不锈钢的焊接工艺要点.....	79	一、焊接接头的白口及淬硬组织	123
四、铁素体不锈钢的焊接实例.....	79	二、焊接裂纹	125
第四节 马氏体不锈钢的焊接	80	第三节 灰铸铁的焊接工艺	127
一、马氏体不锈钢的类型和特性.....	80	一、同质(铸铁型)焊缝的熔焊	127
二、马氏体不锈钢的焊接性.....	80	二、异质(非铸铁型)焊缝的电弧冷焊 ...	132
三、马氏体不锈钢的焊接工艺.....	81	三、灰铸铁的钎焊	138
四、马氏体不锈钢的焊接实例.....	82	四、灰铸铁补焊的工程实例	139
复习思考题	82	第四节 球墨铸铁的焊接	140
附录 A 不锈钢焊条型号表示方法 (GB/T983—1995)	83	一、球墨铸铁的焊接性	140
附录 B 不锈钢焊条新旧型号对照表.....	88	二、球墨铸铁的焊接工艺	140
第五章 耐热钢的焊接	89	三、球墨铸铁补焊的工程实例	142
第一节 耐热钢的类型及性能	89	复习思考题	142
一、耐热钢的类型.....	89	附录 A 铸铁焊条型号表示方法 (GB/T10044—1988《铸铁焊条及焊丝》)	143
二、耐热钢的特性.....	89	附录 B 铸铁焊条牌号表示方法	143
三、对耐热钢焊接接头性能的基本要求.....	90	第七章 常用有色金属的焊接	145
第二节 低、中合金耐热钢的焊接	91	第一节 铝及铝合金的焊接	145
一、低、中合金耐热钢的成分与性能.....	91	一、铝及铝合金的类型及性能特点	145
二、低、中合金耐热钢的焊接性.....	91	二、铝及铝合金的焊接性	145
三、低、中合金耐热钢的焊接工艺.....	94	三、铝及铝合金的焊接工艺	154
四、焊接工程实例.....	97	第二节 铜及铜合金的焊接	162
第三节 高合金耐热钢的焊接	99	一、铜及铜合金的种类及性能特点	162
一、高合金耐热钢的焊接性	100	二、铜及铜合金的焊接性	163
二、高合金耐热钢的焊接工艺	101	三、铜及铜合金的焊接工艺要点	165
三、焊接工程实例	106	第三节 钛及钛合金的焊接	169
第四节 低合金钢与奥氏体不锈钢的焊接	107	一、钛及钛合金的种类及性能特点	170
		二、钛及钛合金的焊接性	171

三、钛及钛合金的焊接工艺要点	173	第三节 堆焊方法的特点	185
复习思考题	175	一、氧乙炔焰堆焊	186
第八章 堆焊	176	二、焊条电弧堆焊	186
第一节 堆焊的用途、类型及特点 ...	176	三、埋弧堆焊	186
一、堆焊的用途	176	四、气体保护和自保护电弧堆焊	187
二、堆焊的类型	176	五、等离子弧堆焊	188
三、堆焊的特点	176	六、电渣堆焊	189
第二节 堆焊合金	177	七、热喷涂和热喷焊	189
一、堆焊合金的类型	177	复习思考题	190
二、堆焊合金的选用原则	183	参考文献	191

绪 论

在金属加工工艺领域中,焊接是一种发展非常迅速的加工方法,目前已发展为一门独立的学科,在机械制造、航空航天、石油化工、冶金、能源、交通、建筑等领域得到了广泛的应用。随着经济与科学技术的发展进步,焊接技术将发挥越来越大的作用。

一、焊接技术的发展现状

现代焊接技术是从 19 世纪 80 年代末开始发展起来的,至今已过了百余年。科学技术的进步,为焊接的发展提供了理论与物质条件,而焊接所具有的技术经济优越性,使之能在不长的时间内发展成为各种装备制造中必不可少的手段。焊接技术的发展主要表现在以下几方面:

1. 新焊接能源的应用

焊接方法的发展依赖于能源的开发与应用。从 20 世纪开始,几乎每隔几年就出现一种新的焊接能源或焊接工艺方法,目前已发展到几十种。当前,除了以电弧为能源的各种常规焊接方法外,以电阻热为能源的电阻焊和以电弧及熔渣为能源的电渣焊等在生产中亦得到广泛的应用。另外,以高速运动的电子束为能源的电子束焊;以激光为能源的激光焊;以等离子弧为能源的等离子弧焊等高能密度的焊接方法,也越来越多地应用于各个生产领域。

2. 焊接技术应用范围的扩大

随着新能源的开发与焊接质量的提高,焊接技术的应用范围有了明显的扩展。目前一些现代化的大型设备,如大型高参数的压力容器与储罐、大吨位油轮、超声速飞机、大功率的核发电设备及水力、火力发电设备等,都大量采用了焊接结构。焊接技术还用于电子元件、火箭、宇宙飞船等尖端精密产品的制造中。

随着产品向高参数、大容量、长寿命、大型化或微型化的方向发展,要求采用一些具有特殊性能的结构材料,如高强度钢、超高强度钢、耐蚀钢、耐热钢,各种有色金属及其合金、难熔金属和活性金属、异种金属、复合材料、功能材料等。因此,用于焊接结构的材料品种也随之有了极大的发展。

应用范围的扩大,对焊接质量提出了更高的要求;反过来,又促进了焊接工艺方法、焊接设备、焊接材料、焊接结构设计和焊接质量检测方法等方面的发展。

3. 焊接生产的机械化与自动化

焊接技术的广泛应用,对焊接质量和生产率的要求日益提高,促进了焊接生产的机械化与自动化。目前,除了一些机械化程度较高的专用机械和专业生产线外,很多发达国家均建成了带程序控制的自动焊接生产线,电子计算机也已用于焊接生产中的数据处理和程序控制。有些工业部门,如汽车制造、水下工程和核电站的维修等,已采用了电子计算机控制的焊接机器人或遥控全位置焊接机,我国研制的焊接机器人在汽车制造行业已广泛使用。

二、本课程研究的对象及内容

金属材料焊接论述的对象是各种金属的焊接性,以及如何根据材料的焊接性特点制定合理的焊接工艺。作为高职高专院校焊接专业教材,本书主要讨论金属结构制造领域中常用金属材料的焊接问题。具体包括以下内容。

- 1) 金属的焊接性及其试验方法。
- 2) 常用焊接结构材料的焊接性特点及焊接工艺,主要论述碳素钢、低合金钢、不锈钢和耐热钢、铝及铝合金、铜及铜合金、钛及钛合金等。
- 3) 铸铁的补焊。根据铸铁的焊接性及铸件补焊的要求,选用合理的补焊方法及焊接材料。
- 4) 堆焊。根据被焊件的使用要求,合理选用各类堆焊合金及堆焊方法等。

三、学习本教材的目的、要求及方法

“金属材料焊接”课程是焊接专业的主要课程之一,它是培养学生掌握有关金属材料的焊接性及焊接工艺知识的一门课程。它的主要任务是使学生掌握常用金属材料的焊接性分析;焊接中易出现的问题及其产生原因、影响因素、解决这些问题的工艺措施与途径;以及为保证焊接接头的性能和质量,如何选择焊接材料,焊接工艺方法等问题。

本课程的教学目的是:

- 1) 掌握各种常用金属材料的焊接性及其特点,熟悉它们在焊接过程中易出现的问题及解决这些问题的方法和途径。
- 2) 能够根据给定的某种常用金属材料,正确选择焊接材料、焊接方法、并制定合理的焊接工艺。
- 3) 熟悉常用金属焊接性的试验方法、特点及应用范围,能够进行一般性的焊接性理论分析与常规的工艺试验。
- 4) 通过本门课程的教学及相关实践教学,能够对金属材料在焊接中出现的各种问题进行理论分析与实验研究,并能提出改进焊接接头质量的措施和办法。

学习本教材建议掌握如下原则:

- 1) 坚持理论与实践结合。即在分析问题时一定不能脱离焊接的特点和具体的生产条件。由于焊接过程中的可变因素很多,同一种材料,用于不同产品或采用不同的工艺方法,出现的问题都可能不一样。理论与实践结合是学习中必须掌握的一个重要原则。
- 2) 善于综合运用多方面的知识。“金属材料焊接”涉及的知识领域与实际问题的十分广泛,只有将各方面的知识融汇贯通,并能在不同条件下加以应用,才能提高分析与解决问题的能力。学习本课程应有较好的“金属学与热处理”、“熔焊原理”和“焊接方法及设备”等课程的基础。
- 3) 以唯物辩证的方法为指导来分析和解决问题。焊接条件下各个变化过程的发生、发展,是存在多种影响因素的,而在一定的具体条件下,要求在众多因素中找到起主要作用的因素,从而抓住解决实际问题的关键所在。

第一章 金属焊接性及其试验方法

绝大部分作为结构材料的金属都要通过焊接方法进行连接,金属材料在焊接时要经受加热、熔化、冶金反应、结晶、冷却、固态相变等一系列复杂的过程,这些过程又都是在温度、成分及应力极不平衡的条件下发生的,有时可能在焊接区造成缺陷,或者使金属的性能下降而不能满足使用时的要求,因而金属材料的焊接性是一项非常重要的性能指标。为了确保焊接质量,必须研究金属材料的焊接性,采用合理有效的工艺措施,以保证获得优质的焊接接头。实践证明,不同的金属材料获得优质焊接接头的难易程度不同,或者说各种金属对焊接工艺的适应性不同。这种适应性就是通常所说的焊接性。本章简要介绍金属焊接性的基本概念及一些常用的焊接性试验方法。

第一节 金属的焊接性

一、金属焊接性的概念

金属焊接性根据 GB/T3375—1994《焊接术语》的定义为:“金属材料在限定的施工条件下,焊接成规定设计要求的构件,并满足预定服役要求的能力”。即金属材料对焊接加工的适应性和使用的可靠性。根据这两方面内容,优质的焊接接头应具备两个条件:即接头中不允许存在超过质量标准规定的缺陷;同时具有预期的使用性能。因此,焊接性的具体内容可分为工艺焊接性和使用焊接性。

1. 工艺焊接性

工艺焊接性是指在一定焊接工艺条件下,能否获得优质、无缺陷的焊接接头的能力。它不仅取决于金属本身的成分与性能,而且与焊接方法、焊接材料和工艺措施有关。随着焊接工艺条件的变化,某些原来不能焊接或不易焊接的金属材料,可能会变得能够焊接和易于焊接。对于熔焊,一般都要经历传热过程和冶金反应过程,因而又可把工艺焊接性分为“热焊接性”和“冶金焊接性”。热焊接性是指焊接热循环对焊接热影响区组织性能及产生缺陷的影响程度。主要与被焊材质及焊接工艺条件有关。冶金焊接性是指冶金反应对焊缝性能和产生缺陷的影响程度。它包括合金元素的氧化、还原、蒸发、氢、氧、氮的溶解等对形成气孔、夹杂、裂纹等缺陷的影响,用以评定被焊材料对冶金缺陷的敏感性。

2. 使用焊接性

使用焊接性是指焊接接头或整体结构满足技术条件中所规定的使用性能的程度。使用性能取决于焊接结构的工作条件和设计上提出的技术要求。通常包括常规力学性能、低温韧性、抗脆断性能、高温蠕变、疲劳性能、持久强度、耐腐蚀性能和耐磨性能等。

二、影响焊接性的因素

焊接性是金属材料的一种工艺性能。除了受材料本身性质影响外，还受到工艺条件、结构条件和使用条件的影响。

(一) 材料因素

材料包括母材和焊接材料。在相同焊接条件下，决定母材焊接性的主要因素是它本身的物理化学性能。对钢而言，有钢的化学成分、冶炼轧制状态、热处理条件、组织状态和力学性能等。其中化学成分（包括杂质的分布）是主要的影响因素，它能决定热影响区的淬硬倾向、脆化倾向和产生裂纹的敏感性。同时，在焊接过程中，由于母材参与熔池的冶金反应，也要影响到焊缝的化学成分。对焊接性影响较大的元素如 C、S、P、O、H 和 N 等，它们容易引起焊接工艺缺陷和降低焊接接头的使用性能。此外，钢材的冶炼轧制状态、热处理条件、组织状态等因素都会对焊接性产生不同的影响。例如经过精炼提纯的 CF 钢、Z 向钢和由控轧得到的“细晶粒钢”（TMCP 钢），在焊接性方面有很大改善。

焊接材料直接参与焊接过程中的一系列化学冶金反应，决定着焊缝金属的成分、组织、性能及缺陷的形成。如果焊接材料选择不当，与母材不匹配，不仅不能获得满足使用要求的接头，还会引起焊接缺陷的产生和组织性能的变化。因此，正确选用焊接材料也是保证获得优质焊接接头的重要冶金条件。

(二) 工艺因素

工艺因素包括焊接方法、焊接参数、预热、后热及焊后热处理等。焊接方法、焊接参数对焊接性的影响，诸如焊接热源的特点、功率密度、保护方式和热输入量等因素，它们会直接决定焊接区的温度场和热循环，从而对焊缝及热影响区的范围大小、组织变化和产生缺陷的敏感性等有明显的影响。应用氩弧焊等焊接方法可使焊接区保护严密，减少合金元素烧损，获得满意的接头性能。工艺措施对焊接性的影响，诸如预热、缓冷、后热及焊后热处理等因素决定了熔池和近缝区的冶金条件，例如，采用焊前预热和焊后缓冷可降低接头的冷却速度，从而降低接头的淬硬倾向和冷裂纹敏感性。选择合理的焊接顺序可以改善结构的约束程度和应力状态。

(三) 结构因素

结构因素主要有焊接结构和焊接接头的设计形式，如结构形状、尺寸、厚度、接头坡口形式、焊缝布置及其截面形状等因素对焊接性的影响。其影响主要表现在热的传递和力的状态方面。不同板厚、不同接头形式或坡口形状其传热方向和传热速度不一样，从而对熔池结晶方向和晶粒成长发生影响。结构的形状、板厚和焊缝的布置等，决定接头的刚度和拘束度，对接头的应力状态产生影响。不良的结晶形态，严重的应力集中和过大的焊接应力等是形成焊接裂纹的基本条件。设计中减少接头的刚度、减少交叉焊缝，避免焊缝过于密集以及减少造成应力集中的各种因素，都是改善焊接性的重要措施。

(四) 使用条件

使用条件因素是指焊接结构的工作温度（高温、低温）、受载类别（静载荷、动载荷、冲击载荷、交变载荷等）和工作环境（焊接结构的服役地点、工作介质有无腐蚀性等）。如在高温下工作时，有可能发生蠕变；在低温或冲击载荷下工作时，会发生脆性破坏；在腐蚀介质中工作时，焊接接头要考虑耐各种腐蚀破坏的可能性。总之，使用条件越苛刻，对焊接

接头的质量要求越高,焊接性就越不容易得到保证。

综上所述,金属的焊接性与材料、工艺、结构及使用条件等密切相关,所以不应脱离开这些因素而单纯从材料本身的性能来评价焊接性,因此很难找到一项技术指标可以概括金属材料的焊接性,只能通过多方面的研究对其进行综合评定。

三、分析金属焊接性的方法

除直接采用焊接试验的方法来确定金属的焊接性之外,通过分析金属的化学成分、物理性能、化学性能、相图特点、连续冷却转变图(CCT图)或模拟焊接热影响区的连续冷却转变图(SHCCT图)等,均可以在某种程度上评价金属的焊接性。

(一) 利用化学成分分析

1. 碳当量法

钢材的化学成分对焊接热影响区的淬硬及冷裂倾向有直接影响,因此可以用化学成分来分析其冷裂敏感性。各种元素中,碳是对冷裂敏感性影响最显著的一个。因而,人们就将各种元素都按相当于若干含碳量折合并叠加起来求得碳当量。所谓“碳当量”就是把钢中包括碳在内的合金元素对淬硬、冷裂及脆化等的影响折合成碳的相当含量。碳当量法是一种粗略评价冷裂纹敏感性的方法。碳当量值越高,钢的淬硬倾向就越大,钢的冷裂敏感性也就越大,焊接性就越差。目前用于评定钢材焊接性的碳当量计算公式很多,其中以国际焊接学会(IIW)所推荐CE,日本JIS标准所规定的 C_{eq} 应用较为广泛。

$$CE = w(C) + 1/6 w(Mn) + 1/5 w(Cr) + 1/5 w(Mo) + 1/5 w(V) + 1/15 w(Cu) + 1/15 w(Ni) \quad (1-1)$$

式中 $w(X)$ 是表示该元素在钢中的质量分数(%),计算碳当量时,应取其成分的上限。

式(1-1)主要适用于中高强度的非调质低合金高强度钢($\sigma_b = 500 \sim 900 \text{ MPa}$)。

$$C_{eq} = w(C) + 1/6 w(Mn) + 1/24 w(Si) + 1/40 w(Ni) + 1/5 w(Cr) + 1/4 w(Mo) + 1/14 w(V) \quad (1-2)$$

式(1-2)主要适用于调质低合金高强度钢($\sigma_b = 500 \sim 1000 \text{ MPa}$)。

式(1-1)、式(1-2)主要适用于含碳量偏高的钢种 [$w(C) \geq 18\%$]。这类钢的化学成分范围如下:

$$\begin{aligned} w(C) &\leq 0.20\%; & w(Si) &\leq 0.55\%; & w(Mn) &\leq 1.5\%; & w(Cu) &\leq 0.5\%; \\ w(Ni) &\leq 2.5\%; & w(Cr) &\leq 1.25\%; & w(Mo) &\leq 0.7\%; & w(V) &\leq 0.1\%; \\ w(B) &\leq 0.006\%. \end{aligned}$$

上述两种公式都说明,碳当量值越大,钢的冷裂敏感性也就越大,焊接性就越差。为了防止冷裂纹,可用碳当量公式确定是否预热和采取其他工艺措施。例如板厚小于20mm, $CE < 0.4\%$ 时,钢材的淬硬倾向不大,焊接性良好,不需预热。当 $CE = 0.4\% \sim 0.6\%$ 时,特别是大于0.5%,钢材易于淬硬,焊接时必须预热才能防止裂纹。随着板厚及碳当量的增加,预热温度也相应增高,一般可在70~200℃之间。

2. 焊接冷裂纹敏感指数

焊接冷裂纹敏感指数(P_c)不仅包括了母材的化学成分,又考虑了熔敷金属含氢量与

拘束条件的作用。

$$P_c = w(C) + 1/30 w(Si) + 1/20 w(Mn + Cu + Cr) + 1/60 w(Ni) + 1/15 w(Mo) + 1/10 w(V) + 5 w(B) + \delta/600 + H/60 (\%) \quad (1-3)$$

式中 δ ——板厚 (mm);

H——焊缝中扩散氢含量 (mL/100g)。

式 (1-3) 适用条件: $w(C)$ 0.07% ~ 0.22%; $w(Si) \leq 0.60\%$; $w(Mn)$ 0.40% ~ 1.40%; $w(Cu) \leq 0.50\%$; $w(Cr) \leq 1.20\%$; $w(Ni) \leq 1.20\%$; $w(Mo) \leq 0.70\%$; $w(V) \leq 0.12\%$; $w(Nb) \leq 0.04\%$; $w(Ti) \leq 0.05\%$; $w(B) \leq 0.005\%$; $\delta = 19 \sim 50\text{mm}$; $H = 1.0 \sim 5.0\text{mL/100g}$ (GB/T3965—1995《熔敷金属中扩散氢测定方法》)

根据 P_c 值可以通过经验公式求出斜 Y 形坡口对接裂纹试验条件下, 为了防止冷裂纹所需要的最低预热温度 T_0 (°C)

$$T_0 = 1440P_c - 392 \quad (1-4)$$

(二) 利用金属材料的物理性能分析

金属的熔点、热导率、线胀系数、比热容以及密度等物理性能, 对焊接热循环、冶金反应以及凝固相变等过程都有明显的影响, 根据金属材料物理性能的特点, 可以预计出在焊接过程中出现的问题, 并设法加以预防及解决。如焊接热导率大的材料——铜, 由于其散热快, 焊接时容易产生熔透不足的缺陷, 在凝固过程中又很容易产生气孔; 而有些热导率低的材料 (如钛、不锈钢), 则因为焊接时温度梯度大, 会产生较大的应力或变形, 而且由于高温停留时间延长而导致晶粒粗化等。此外, 焊接线胀系数大的材料 (如不锈钢), 接头的应力变形必然严重; 焊接密度小的材料 (如铝及其合金), 则容易在焊缝中形成气孔或夹杂物。

(三) 利用金属材料的化学性能分析

化学性能比较活泼的金属 (如铝、钛及其合金), 在焊接过程中极易被氧化, 有些金属甚至对氧、氢、氮等气体都极为敏感。因此这些材料在进行焊接时, 需要采用较为可靠的保护方法 (如惰性气体保护焊或在真空中焊接), 有时焊缝背面也需要采取保护措施, 以防止氧、氢、氮等对焊缝及热影响区的污染。

(四) 利用合金相图分析

大多数被焊材料都是合金, 或至少含有某些杂质元素, 因而可以利用其相图分析焊接性问题。例如, 对于共晶型相图来说, 其固、液相线之间的温度区间大小, 会影响结晶时的成分偏析, 影响生成低熔点共晶的程度, 也影响脆性温度区间的大小, 这对分析热裂纹倾向是重要的参考依据。另外, 若结晶凝固时形成单向组织, 则焊缝晶粒易于粗大, 也是形成热裂纹的重要影响因素。

(五) 利用 CCT 图或 SHCCT 图分析

对于各类低合金钢, 可以利用其各自的连续冷却曲线 (CCT 图) 或模拟焊接热影响区的连续冷却曲线图 (SHCCT 图) 分析其焊接性问题。这些曲线可以大体上说明在不同焊接热循环条件下将获得什么样的金相组织和硬度, 可以估计有无冷裂的危险, 以便确定适当的焊接工艺条件。

以上列出的分析焊接性的几个主要依据, 只是作为分析焊接性时的参考, 而不能作为准确的评价指标。只有通过焊接性试验才能得到准确的结果。

第二节 金属焊接性试验

焊接性试验即评定母材焊接性的试验。通过焊接性试验可以评定某种金属材料焊接性的优劣；对不同材料进行焊接性的比较；为选择焊接方法、焊接材料和确定焊接参数提供可靠依据。

一、焊接性试验的内容

针对材料的不同性能特点和不同使用要求，焊接性试验包括以下内容。

(一) 焊缝金属抵抗产生热裂纹的能力

热裂纹是一种较常发生又危害严重的焊接缺陷，是熔池金属结晶过程中，由于存在一些有害元素（易形成低熔点共晶物的元素）并受热应力的作用而在结晶末期发生。热裂纹既和母材有关，又和焊接材料有关。所以测定焊缝金属抵抗热裂纹的能力是焊接性试验的一项重要内容。

(二) 焊缝及热影响区金属抵抗产生冷裂纹的能力

焊缝及热影响区金属在焊接热循环作用下，由于组织及性能变化，加之焊接应力和扩散氢的影响，可能发生冷裂纹。冷裂纹在低合金高强度钢焊接中是较为常见的缺陷，而且也是一种危害严重的缺陷，是焊接性试验中很重要、又最常用到的一项试验内容。

(三) 焊接接头抗脆性转变的能力

对于在低温条件下工作的焊接结构和承受冲击载荷的焊接结构，可能经过焊接的冶金反应、结晶、固态相变等一系列过程，焊接接头会发生粗晶脆化、组织脆化、热应变时效脆化等现象。使接头韧性严重下降，即焊接接头发生脆性转变。因此，对这类焊接结构用材料，需要作抗脆断能力（或抗脆性转变能力）的试验。

(四) 焊接接头的使用性能

根据焊接结构的使用条件对焊接性提出的性能要求来确定试验内容。使用要求是多方面的，例如在腐蚀介质工作的焊接结构要求抗腐蚀性能，就可以确定做焊接接头的耐晶间腐蚀或耐应力腐蚀能力等试验；厚板结构要求抗层状撕裂性能时，就应做 Z 向拉伸或窗口试验，以测定该钢材抗层状撕裂的能力。此外还有如焊接接头的耐磨性、低温冲击韧度、蠕变强度、疲劳强度以及产品技术条件要求的其他特殊性能。

二、焊接性试验方法分类

研究与评定金属材料焊接性的试验方法很多，根据试验的内容和特点主要分为工艺焊接性和使用焊接性两大方面的试验，每一方面又分为直接法和间接法两种类型。

(一) 直接法试验

直接法有两种情况：一种是仿照实际焊接的条件，通过焊接过程考查是否发生某种焊接缺陷，或发生缺陷的严重程度，直接去评价焊接性的优劣（即焊接性对比试验）。也可以通过试验确定出所需的焊接条件（即工艺适应性试验）。这种情况多在工艺焊接性试验中使用；另一种是直接在产品上进行测定其焊接性能的试验，这种情况主要用于使用焊接性方面的试验。

1. 直接模拟试验

(1) 焊接冷裂纹试验 常用的有插销试验、斜 Y 形坡口对接裂纹试验、拉伸拘束裂纹试验 (TRC 试验)、刚性拘束裂纹试验 (RRC 试验) 等。

(2) 焊接热裂纹试验 常用的有可调拘束裂纹试验、菲斯柯 (FISCO) 焊接裂纹试验、窗形拘束对接裂纹试验、刚性固定对接裂纹试验等。

(3) 再热裂纹试验 有 H 形拘束试验、缺口试棒应力松弛试验、U 形弯曲试验等。

(4) 层状撕裂试验 常用的有 Z 向拉伸试验、Z 向窗口试验等。

(5) 应力腐蚀裂纹试验 有 U 形弯曲试验、缺口试验、预制裂纹试验等。

(6) 脆性断裂试验 除低温冲击试验外,常用的还有落锤试验、裂纹张开位移试验 (COD) 以及 Wells 宽板拉伸试验等。

2. 使用性能试验

属于这一类试验的方法主要有:焊缝及接头的拉伸、弯曲、冲击等力学性能试验、高温蠕变及持久强度试验、断裂韧性试验、低温脆性试验、耐磨及耐腐蚀试验、疲劳试验等。直接用产品做的试验有水压试验、爆破试验等。

(二) 间接法推算

间接法一般不需要焊出焊缝,只需对产品实际使用的材料作化学成分、金相组织或力学性能等的试验分析与测定,然后根据分析与测定的结果,对该材料的焊接性进行推测与评估。属于这一类的方法主要有:碳当量法、焊接裂纹敏感指数法、连续冷却组织转变曲线法、焊接热-应力模拟法、焊接热影响区最高硬度试验方法及焊接区断口金相分析等。

三、焊接性试验方法的选择原则

现有的焊接性试验方法很多,随着技术的进步,要求的提高,焊接性试验方法还会不断增加。选择焊接性试验方法时一般应遵循下列原则:

(一) 针对性

所选择的试验方法,其试验条件要尽量与实际焊接时的条件相一致,这些条件包括母材、焊接材料、接头形式、接头受力状态、焊接参数等。而且试验条件还应考虑到产品的使用条件,尽量使之接近。只有这样才能使焊接性试验具有良好的针对性,其试验结果才能够较准确地显示出实际生产时可能发生的问题或可能出现的现象。

(二) 可比性

只有试验条件完全相同时,两个试验的结果才具有可比性。因此,凡是国家或国际上已经颁布的标准试验方法,应优先选择,并严格按照标准的规定进行试验。尚没有建立标准的,应选择国内外同行业中较为通用或公认的试验方法进行试验。

(三) 可靠性

焊接性试验的结果要稳定可靠,具有较好的再现性。试验数据不可过于分散,否则难以找出变化规律和导出正确的结论,为此,试验方法应尽量减少或避免人为因素的影响,多采用自动化、机械化的操作,少用人工操作。试验条件和试验程序要规定得严格,防止随意性。

(四) 经济性

在符合上述原则并可获得可靠结果的前提下,力求减少材料消耗,避免复杂昂贵的加工

工序, 节省试验费用。

第三节 常用的焊接性试验方法

焊接性试验方法种类很多, 因抗裂性能是衡量金属焊接性的主要标志, 所以在生产中还是常用焊接裂纹试验来表征材料的焊接性。这里重点介绍最为常用的斜 Y 形坡口焊接裂纹试验、插销试验和热影响区最高硬度试验, 并简要介绍一些其他试验方法。

一、斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法

这是一种在工程上广泛应用的试验方法。该试验主要用于评价碳钢和低合金高强度钢焊接热影响区的冷裂纹敏感性。其试验规范应遵循 GB/T4675.1—1984《焊接性试验—斜 Y 形坡口焊接裂纹试验方法》。

试件的形状和尺寸如图 1-1 所示, 由被焊钢材制成。板厚 δ 不作规定, 常用 9~38mm, 试件坡口采用机械切削加工, 每一种试验条件要制备两块以上试件。两侧各在 60mm 范围内施焊拘束焊缝, 采用双面焊透。要保持待焊试验焊缝处有 2mm 装配间隙和不产生角变形。

试验焊缝所用的焊条原则上与试验钢材相匹配, 焊前要严格进行烘干; 根据需要可在各种预热温度下焊接; 推荐采用下列焊接参数: 焊条直径 4mm, 焊接电流 (170 ± 10) A, 电弧电压 (24 ± 2) V, 焊接速度 (150 ± 10) mm/min。在焊接试验焊缝时, 如果

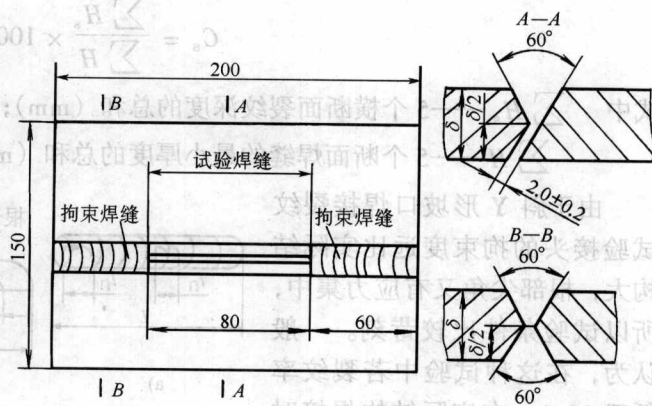


图 1-1 试件的形状和尺寸^[1]

采用焊条电弧焊时, 按图 1-2 所示进行焊接; 如果采用焊条自动送进装置焊接时, 按图 1-3 所示施焊。均只焊接一道焊缝且不填满坡口, 焊后试件经 48h 后, 对试件进行检测和解剖。

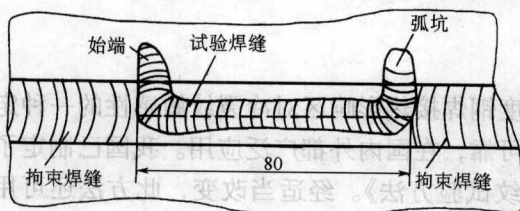


图 1-2 焊条电弧焊的试验焊缝^[1]

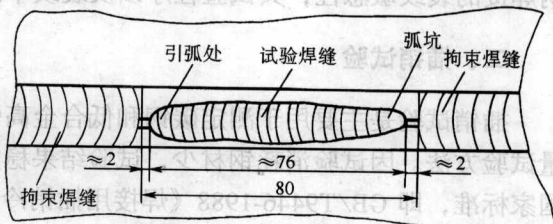


图 1-3 焊条自动送进的试验焊缝^[1]

检测裂纹时用肉眼或手持放大镜仔细检查焊接接头表面和断面是否有裂纹, 并按下列方法分别计算表面、根部和断面的裂纹率。图 1-4 为试样裂纹长度的计算。